



Différentes stratégies de filtrage en pilotage inertiel multicritères.

Maurice Pillet, Eric Pairel, Jean-Luc Maire, Boukar Abdelhakim

► To cite this version:

Maurice Pillet, Eric Pairel, Jean-Luc Maire, Boukar Abdelhakim. Différentes stratégies de filtrage en pilotage inertiel multicritères.. 7ème Conférence Internationale en Conception & Production Intégrées, Oct 2011, Oujda, Maroc. hal-00634863

HAL Id: hal-00634863

<https://hal.science/hal-00634863>

Submitted on 12 Dec 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Différentes stratégies de filtrage en pilotage inertiel multicritères

Pillet Maurice, Eric Pairel, Jean Luc Maire, Boukar Abdelhakim

Université de Savoie – Laboratoire SYMME

Maurice.pillet@univ-savoie.fr

Eric.pairel@univ-savoie.fr

Jean-luc.maire@univ-savoie.fr

Boukar.Abdelhakim@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ. Le pilotage inertiel multicritère est une approche nouvelle pour le pilotage des processus de production. Il consiste à minimiser l'inertie ($I = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - \text{Cible})^2}$) sur l'ensemble des caractéristiques du produit en recherchant les actions optimales sur le vecteur d'action de réglage. L'approche consiste dans un premier temps à rechercher par calcul ou par expérimentation la matrice d'incidence du vecteur d'action sur le vecteur des caractéristiques, puis de calculer la pseudo inverse de la matrice d'incidence pour obtenir la matrice de pilotage.

On doit cependant tenir compte de deux éléments : la variabilité naturelle du processus et le niveau de qualité différent que l'on veut obtenir sur chacune des caractéristiques. Dans ce contexte l'application directe du pilotage par la pseudo inverse ne donne pas les résultats optimums et on doit adapter une stratégie de filtrage des écarts. Plusieurs stratégies sont possibles :

- 1. L'utilisation d'une matrice d'incidence pondérée*
- 2. Le filtrage des écarts à partir de cartes de contrôle individuelles*
- 3. Le filtrage pour garantir l'inertie avec un risque beta*
- 4. L'optimisation par un filtrage en deux temps des écarts*
- 5. L'utilisation du réglage pondéré*

Après avoir brièvement rappelé les grandes lignes du pilotage inertiel multicritères, l'article décrit chacune des stratégies de filtrage possible qui peuvent être utilisées seules ou de façon combinée. Une validation du gain apporté par chacune des stratégies est réalisée par simulation de la réalisation d'une pièce mécanique par plan d'expériences de résolution IV.

1. Introduction

La qualité de la production des pièces mécaniques est un point critique de la perception de la qualité des produits assemblés par le client. Aussi la maîtrise de la variabilité en production à des niveaux toujours plus faibles introduit des contraintes importantes pour le pilotage des machines. Kumar (2007) sépare généralement trois types de variabilité à maîtriser : la variabilité inhérente à la machine et aux moyens de fixation de la pièce sur la machine, la variabilité sur la qualité des états de surfaces, la variabilité sur les écarts dimensionnels. Nous nous intéressons dans cet article au troisième type : les écarts dimensionnels.

Toutes les machines ont des dérives, des écarts qu'il convient de compenser. Cette compensation est traditionnellement réalisée par un régleur qui, en fonction des résultats mesurés sur les pièces, calcule l'ensemble des corrections nécessaires pour produire une pièce conforme.

Le pilotage des machines à commande numérique par la maîtrise statistique des processus a été étudié par plusieurs auteurs. Motorcub (2006) montre l'utilisation des outils de cartes de contrôle pour l'amélioration des paramètres de production, Jenningsa (1996) utilise également les outils de la Maîtrise Statistique des Processus pour maîtriser trois caractéristiques. Gibson (1994) propose d'implémenter un outil de maîtrise statistique des processus automatique en mesurant directement sur la machine des décalages de longueur d'outils. Kumar (2007) utilise une technique d'analyse des productions précédentes par data mining encapsulé dans un analyseur de processus pour déterminer des règles de mesure correctives sur le processus. Dong (2007) propose une approche alternative aux cartes de contrôle en utilisant une approche fondée sur les *moindres carrés flous* des machines à vecteurs de support (SVM).

Peu d'articles prennent en compte les relations de dépendance facilement identifiable entre les différents paramètres. Goldschmidt (2009) et Pairel (2011) propose dans le cas de décolletage de pièces mécaniques une approche complète de recherche de gamme de réglage la plus adaptée (Copilot). Le pilotage est réalisé par une matrice reliant les paramètres de la pièce aux paramètres de pilotage. L'approche de pilotage inertiel multicritère aborde également le problème du pilotage des machines sous ce point de vue.

2. Pilotage inertiel multicritères

L'objectif du pilotage inertiel multicritères est de minimiser les inerties sur l'ensemble des caractéristiques dépendantes d'un processus. Il est particulièrement facile à utiliser dans le cas d'un usinage à commande numérique.

Rappelons que l'inertie est donnée par l'expression (eq1)

$$I = \sqrt{\sigma^2 + \delta^2} \quad \text{Eq 1}$$

Avec

σ : l'écart type de la population

δ : le décentrage par rapport à la cible

La conformité inertielle est définie par la norme XP E04 008. Une caractéristique notée $10^{0.01 \over \langle \text{STI} \rangle}$ signifie que l'inertie maximale est égale à 0.01.

Si on prend l'exemple de la figure 1, on doit garantir sur cette pièce l'inertie sur les caractéristiques a à g ainsi que sur les cinq diamètres. Le tableau 1 donne les valeurs cibles et les inerties de ces caractéristiques.

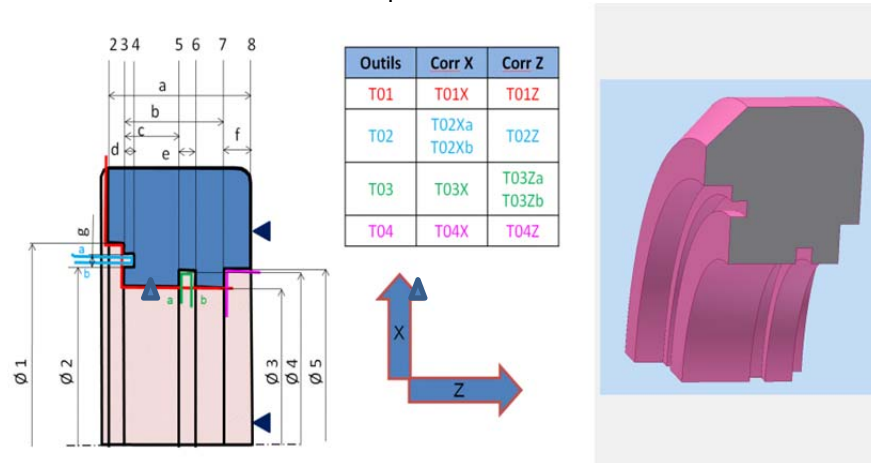


Figure 1. Exemple de pièce à réaliser en usinage

L'exemple de la figure 1 illustre bien le problème en mécanique lorsque plusieurs caractéristiques sur la pièce dépendent elles même de plusieurs critères de pilotage. Dans l'exemple, on peut facilement trouver la relation matricielle $E=AC$ qui lie le vecteur des écarts par rapport aux cibles des caractéristiques (E) au vecteur des correcteurs de longueur et de rayon des 3 outils (C). Le tableau 2 donne la matrice d'incidence des actions de correction sur les caractéristiques.

caractéristique	cible	I_{MAX}	Ecart Mesuré
a	5.4	0.033	-0.011
b	3.72	0.003	-0.028
c	2.12	0.013	-0.024
d	0.46	0.007	-0.029
e	0.65	0.010	-0.019
f	1.1	0.017	0.004
g	0.6	0.010	-0.007
$D1$	13.52	0.007	0.023
$D2$	12	0.017	0.028
$D3$	10.42	0.007	0.02
$D4$	11.6	0.013	0.012
$D5$	11.8	0.013	0.011

Tableau 1. Tolérances inertielles et écarts mesurés de la pièce

caract	T01X	T02Xa	T02Xb	T03X	T04X	T01Z	T02Z	T03Za	T03Zb	T04Z
<i>a</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>b</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
<i>c</i>	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
<i>d</i>	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0
<i>e</i>	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0
<i>f</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
<i>g</i>	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
<i>D1</i>	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>D2</i>	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
<i>D3</i>	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>D4</i>	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0
<i>D5</i>	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0

Tableau 2. *Matrice d'incidence A*

Le problème du pilotage inertiel consiste à trouver les actions de pilotage qui - après réglage - minimiseront les inerties, avec, dans ce cas, une matrice qui n'est pas carrée. Il y a donc une infinité de réglages possibles.

L'inertie globale étant la racine carrée des carrés des écarts à la cible, la solution pour minimiser ces écarts est naturellement la minimisation des moindres carrés. On trouve donc le vecteur des corrections à apporter en calculant :

$$C = [A^t A]^{-1} A^t . E = P . E \quad \text{eq 2}$$

Le tableau 2 donne la matrice de pilotage P

	a	b	c	d	e	f	g	D1	D2	D3	D4	D5
T01X	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.25	0.00	-0.25	0.00	0.00
T02Xa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.00	0.00	-0.50	0.00	0.00	0.00
T02Xb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
T03X	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.50	0.00
T04X	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.50
T01Z	0.67	0.33	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T02Z	0.67	0.33	0.00	-1.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T03Za	-0.67	-0.33	1.00	0.00	0.00	-0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T03Zb	0.67	0.33	-1.00	0.00	-1.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T04Z	-0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	-0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau 2. *Matrice de pilotage P*

L'équation 2 permet de calculer directement les corrections qui minimisent les moindres carrés – c'est-à-dire qui minimise l'inertie globale des caractéristiques. La figure 2 donne les corrections réalisées, l'écart avant et l'écart après correction.

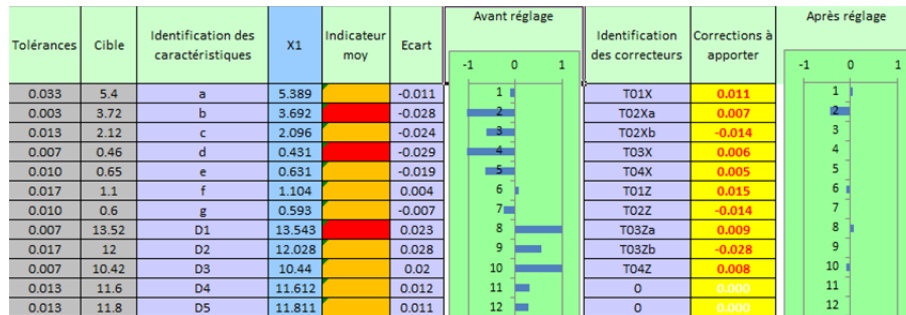


Figure 2. Correction réalisée

Cette approche qui permet de trouver la correction minimisant les moindres carrées peut être largement améliorée par plusieurs modalités d'application :

1. Le pilotage inertiel pondéré par l'importance relative de la tolérance.
2. Un filtrage des écarts par cartes de Shewhart ou par carte inertielle.
3. Une correction par filtrage partielle.
4. Un réglage par la recherche du décentrage le plus probable.
5. L'utilisation d'un filtre beta.
6. Le filtrage par une approche multicritère de type T^2 de Hostelling

En effet, une partie des écarts mesurés provient de la dispersion aléatoire du processus. L'action de correction systématique des écarts reviendrait parfois à corriger une machine parfaitement centrée (principe de Shewhart). Cependant cet article montre que si un filtrage par carte de Shewhart améliore les résultats obtenus par rapport à une compensation systématique, cette approche peut être grandement améliorée par l'utilisation des approches ci-dessus.

Les cinq premières approches seront rapidement détaillées, puis nous proposerons une comparaison des gains de chacune de ces approches à partir d'un plan d'expériences réalisé par simulation monte-carlo.

3. Pilotage inertiel multicritères et approches complémentaires

3.1. Pilotage inertiel pondéré par l'importance relative de la tolérance (PIP)

Le pilotage inertiel multicritère vise à minimiser le carré des écarts à la cible sur l'ensemble des caractéristiques. Dans le cas où les tolérances sont d'un même ordre de grandeur, le réglage obtenu est optimal. Cependant si l'ordre de grandeur des tolérances n'est pas le même, alors l'équilibrage global des écarts au carré sera défavorable aux tolérances les plus serrées. Pillet (2010 ou 2011) a proposé une approche qui consiste à ramener l'ensemble des écarts dans une tolérance standard. La matrice de pilotage est pondérée par les tolérances. L'équilibrage est alors réalisé non pas sur les écarts mais sur la proportion de l'écart par rapport aux tolérances.

3.2. Pondération de réglage par la recherche du décentrage le plus probable (PR)

La carte de contrôle crée un effet de seuil. Lorsqu'un écart est déclaré hors contrôle on compense intégralement cet écart. Pillet (2011) a proposé une alternative qui peut être complémentaire aux cartes de contrôle (ou se substituer) en calculant le décentrage le plus probable compte tenu de la dispersion naturelle du processus et de l'écart mesuré. D'un point de vue pratique, cela revient à compenser l'écart affecté d'un coefficient compris entre 0 et 1 qui dépend de la dispersion court terme, de la taille des échantillons et de l'écart mesuré. Nous avons montré que le décentrage le plus probable se calculait par la relation suivante :

$$\text{Ajustement optimal} = \frac{nr^2}{(9+nr^2)} E \quad \text{avec } r = \frac{E}{\sigma_{ST}} \quad \text{Eq 3}$$

Avec :

n : la taille de l'échantillon

E : l'écart mesuré entre la moyenne et la cible

σ_{ST} : L'écart type court terme de la production

Ainsi un décentrage mesuré E de 4 écarts types sur 3 pièces ne donnera pas lieu à un réglage de 4 écarts types mais à un réglage de :

$$\text{Ajustement optimal} = \frac{3 \times 16}{(9 + 3 \times 16)} 4 = 3.37 \quad \text{avec } r = \frac{4\sigma_{ST}}{\sigma_{ST}} = 4$$

3.3. Filtrage des écarts par carte de Shewhart ou par carte inertielle (FE)

Lorsque l'on mesure une pièce complexe, on trouve toujours des écarts à la cible, même minimes. Ces écarts peuvent venir en partie de la dispersion aléatoire du processus. Le réglage systématique des écarts revient à rajouter à la variabilité du processus une variabilité de réglage. Il est préférable de n'agir sur le processus que lorsque l'on a une forte présomption de dérèglement. Shewhart(1931) a proposé l'utilisation de cartes de contrôle dont on montre facilement l'efficacité sur la figure 3. La simulation consiste à réaliser 10000 pièces d'une part avec un réglage systématique de l'écart trouvé, d'autre part avec un filtre placé à ± 3 sigma des écarts. Les conditions de simulation sont une moyenne centrée sur la moyenne 15 avec un écart type de 1. Les données sont générées par un algorithme de Mersenne Twister fournissant une excellente répartition gaussienne sur plus de ± 6 sigma.

Le réglage systématique de l'écart conduit à une augmentation de la variabilité court terme très importante, ainsi que de la dispersion long terme. Pillet (2007) a également proposé une carte de contrôle qui pilote les processus directement à partir de l'inertie.

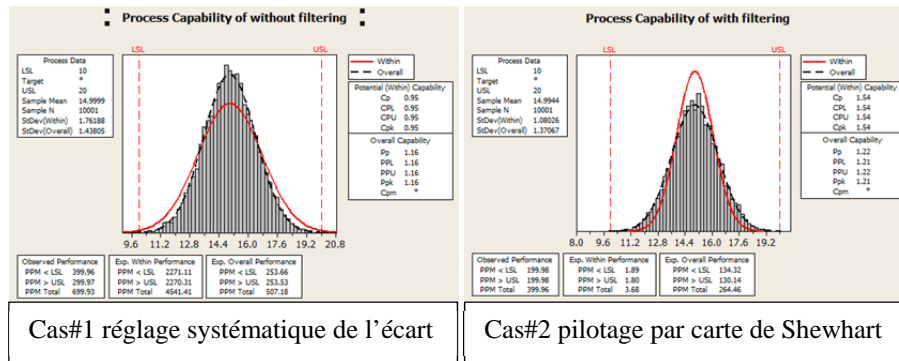


Figure 3. Filtrage par carte de Shewhart

3.4. Une correction calculée sur écart filtrés ou correction complète de tous les correcteurs impactés (CC)

Le principe du filtrage par carte de contrôle consiste à ne pas corriger l'écart lorsqu'il est inférieur aux limites. Si on reprend la matrice de pilotage donnée dans le tableau 2, on s'aperçoit que le calcul du correcteur CT2L dépend de l'ensemble des écarts. Si une partie des écarts est sous contrôle (dans les limites) et une autre partie est hors contrôle, le calcul de la correction est réalisé en partie sur des écarts mesurés, et en partie sur des écarts annulés par le filtrage.

La correction complète de tous les correcteurs impactés consiste à filtrer les écarts par carte de contrôle, mais si un correcteur doit être calculé à cause d'une situation hors contrôle, alors on prend en compte tous les écarts impactant ce correcteur y compris ceux qui sont sous contrôle.

3.5. Utilisation d'un filtre beta

La dernière méthode qui sera comparée aux autres par plan d'expériences sera l'utilisation d'un filtre des risques beta. Lorsque la capacité est très bonne, les limites de contrôle sont très resserrées autour de la cible, ce qui conduit à un nombre accru de réglage pas toujours nécessaires pour obtenir une bonne capacité. On peut calculer un filtre (Pillet 2010) permettant de garantir avec un risque beta que l'inertie de la production sera meilleure que le minimum exigé. Lorsque cette limite permet une excursion de la moyenne supérieure à l'excursion autorisée par les cartes de Shewhart, on privilégiera les limites au risque beta.

4. Comparaison des différentes méthodes par simulation de Monte Carlo et plans d'expériences

4.1. Le simulateur

Pour simuler l'intérêt de ces différentes règles, nous avons utilisé le simulateur "SIMDI MSP Pilotage Inertiel" de OGP transfert (2011) qui simule la réalisation d'une pièce classique de tournage dont le dessin est donné en figure 1.

La pièce est réalisée en une seule phase avec 5 diamètres et 7 cotes interdépendantes vis-à-vis des correcteurs. La simulation consiste à réaliser 100 000 pièces en utilisant les différentes règles de pilotage énumérées ci-dessus. Le simulateur génère des dérives d'outils, que le réglage doit compenser. Pour cela un prélèvement de 3 pièces toutes les 50 pièces est réalisé. Les 3 pièces sont mesurées sur l'ensemble des caractéristiques. Les écarts trouvés sur ces trois pièces permettent de calculer le réglage en fonction des règles retenues. Ces réglages sont effectués, avec l'hypothèse d'une machine dont les corrections sont conformes aux réglages effectués. Il n'y a pas de vérification de l'efficacité du réglage. Après réglage un lot de 50 pièces est produit sans vérification intermédiaire

4.2. Principe de la simulation

4.2.1. Plan d'expériences

Les règles testées sont au nombre de cinq :

- (PIP) Pilotage avec ou sans pondération inertielle
- (PR) Avec ou sans la pondération de réglage
- (FE) Filtrage des écarts par carte de contrôle ou pas de filtrage
- (CC) Correction complète de tous les correcteurs impactés ou filtrage partiel
- (FB) Filtre beta (avec ou sans)

Chacune de ces règles étant à 2 niveaux et pouvant se combiner, le nombre de possibilités est donc de $2^5 = 32$ combinaisons.

Nous ne ferons qu'une partie de ces combinaisons grâce à un plan d'expériences fractionnaire à 16 essais de résolution V. Il permet d'étudier, avec la moitié des simulations, l'ensemble des effets du premier et du second ordre (interactions). Nous avons donc choisi de valider les règles avec ce plan de très bonne résolution, donné en figure 4.

4.2.2. Les simulations

Les réponses étudiées sont

- le nombre de réglage nécessaires,
- la variabilité moyenne long terme obtenue sur l'ensemble des caractéristiques (moyenne des indicateurs Pp)
- La variabilité obtenue sur la caractéristique la plus difficile à piloter (Cote b)

Sur ces trois réponses, les deux dernières sont les plus importantes. Le nombre de réglages nécessaires n'est pas forcément un critère pertinent si on se place dans un contexte moderne de liaison directe entre le moyen de mesure et la commande numérique de la machine. En effet dans ces conditions, l'envoi de corrections se fait sans aucune intervention humaine et ne coûte pas de temps machine.

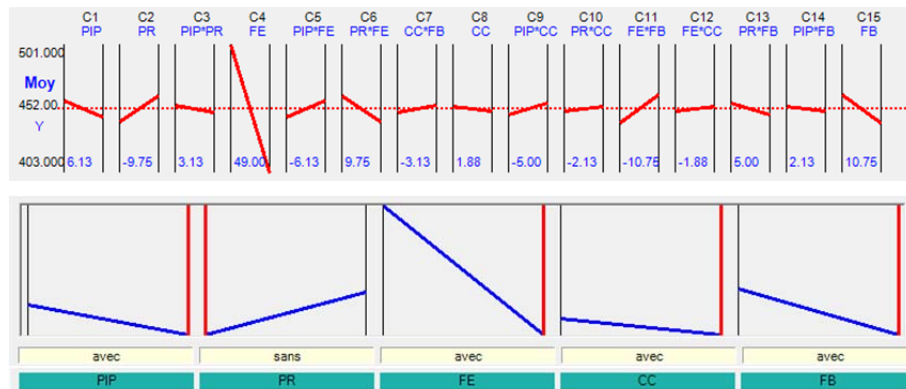
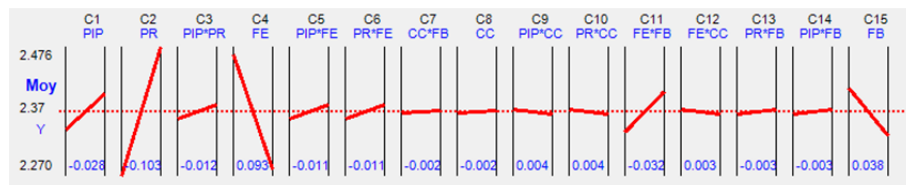
	PIP	PR	FE	CC	FB	Rep 1
1	sans	sans	sans	sans	sans	
2	sans	sans	sans	avec	avec	
3	sans	sans	avec	sans	avec	
4	sans	sans	avec	avec	sans	
5	sans	avec	sans	sans	avec	
6	sans	avec	sans	avec	sans	
7	sans	avec	avec	sans	sans	
8	sans	avec	avec	avec	avec	
9	avec	sans	sans	sans	avec	
10	avec	sans	sans	avec	sans	
11	avec	sans	avec	sans	sans	
12	avec	sans	avec	avec	avec	
13	avec	avec	sans	sans	sans	
14	avec	avec	sans	avec	avec	
15	avec	avec	avec	sans	avec	
16	avec	avec	avec	avec	sans	

Figure 4. *Plan d'expériences des différentes stratégies*

4.3. Résultats

Le tableau 3 donne les résultats des différentes simulations, les figures 5, 6 et 7 donnent le graphe des effets pour les trois réponses. La première partie de la figure donne l'ensemble des effets (facteurs et interactions), la seconde partie de la figure donne le graphe des effets des facteurs dans la configuration optimale.

Essai	Nb réglage	Moyenne Pp	Pp cote b
1	501	2.31	0.6
2	501	2.29	0.58
3	370	2.10	1.17
4	434	2.22	0.72
5	501	2.55	1.25
6	501	2.56	1.19
7	448	2.43	1.45
8	409	2.30	1.29
9	501	2.40	1.63
10	501	2.41	1.63
11	396	2.28	1.52
12	334	2.15	1.52
13	501	2.61	1.77
14	501	2.60	1.75
15	413	2.29	1.63
16	420	2.47	1.66

Tableau 3. *Résultat des 16 simulations*Figure 4. *Graphe des effets – réponse : nombre de réglages (minimiser)*

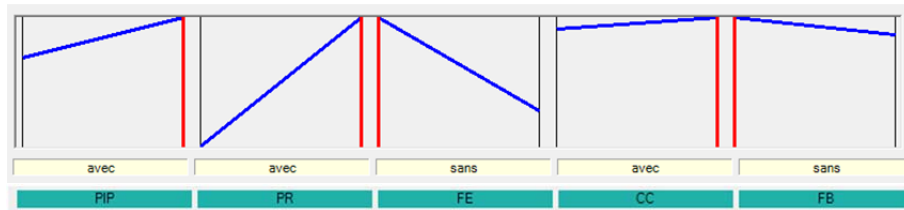


Figure 5. Graphe des effets – réponse : Pp Moyen (maximiser)

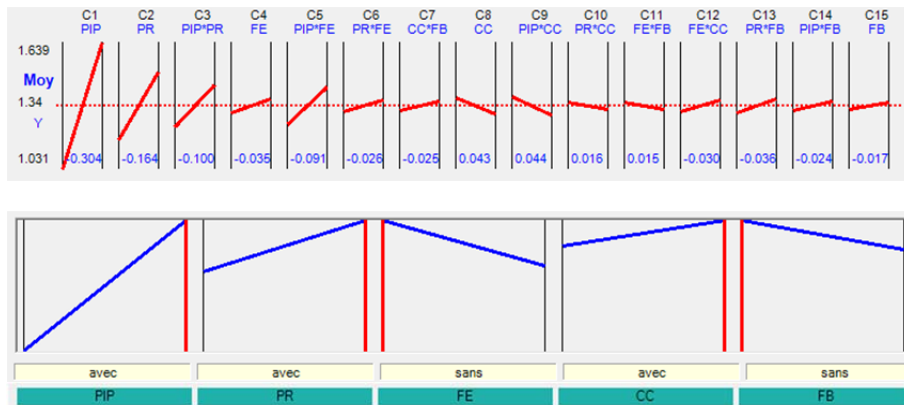


Figure 6. Graphe des effets – réponse : Pp cote b (maximiser)

Le meilleur résultat en capacité, tant pour la moyenne des Pp que pour le Pp sur la cote la plus sensible étant obtenu pour la configuration :

- Matrice de pilotage pondérée par les tolérances
- Utilisation du réglage pondéré.
- Sans filtrage par carte de contrôle.
- Avec la correction complète de tous les correcteurs impactés.
- Sans utiliser le filtre beta, qui de toute façon n'aurait pas été utilisé.

Cet essai ne figure pas dans les 16 essais du plan fractionnaire, nous l'avons testé afin de vérifier le modèle. Le tableau 4 donne les résultats obtenus. Le calcul de l'erreur de prévision est réalisé en faisant le ratio entre l'écart de prévision et la plage de variation de la réponse dans le plan d'expérience. Cette erreur étant très faible, on peut valider le modèle qui tient compte de l'ensemble des effets de premier et de second ordre.

Configuration					
Facteurs	Pilotage inertiel pondéré	Pondération de réglage	Filtrage des écarts par carte de contrôle	Correction complète	Filtre sur risque beta
Niveaux	OUI	OUI	NON	OUI	NON
Résultats					
Réponses	Prévu par le modèle		Obtenus	Erreur de prévision	
Nombre de réglages	493		501	4.3%	
Pp Moyen	2.63		2.61	3%	
Pp sur la cote b	1.915		1.81	7.4%	

Tableau 4. *Optimum pour les capacités*

4.4. Discussion

4.4.1. Importance des filtres alpha et beta sur le nombre de réglage

Un premier résultat – évident – est l'importance du filtrage par carte de contrôle sur le nombre de réglages générés. Si on veut minimiser le nombre de réglages, il faut filtrer les écarts au moins sur les risques alpha. Le filtrage sur le risque beta est également un élément qui diminue le nombre de réglage.

4.4.2 Faire mieux que les cartes de contrôle de Shewhart

Les résultats de cette expérimentation peuvent apparaître très surprenants quant à l'influence du paramètre de filtrage par cartes de contrôle. En effet les meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'on ne filtre pas les écarts MAIS en utilisant la pondération de réglage.

Le fait de ne pas filtrer devrait avoir tendance à augmenter la variabilité comme nous l'avons montré au paragraphe 3.1. Ce n'est pas le cas, c'est même le contraire si l'on utilise la pondération de réglage. Le filtrage est donc nécessaire mais on montre ici un résultat très important : il est préférable de ne pas utiliser de cartes de contrôle pour filtrer les écarts, mais d'utiliser un filtrage pondéré suivant la relation donnée par l'équation 3 !

Ce filtrage élimine l'effet de seuil généré par les cartes. La correction étant proportionnelle à l'écart, on obtient bien un filtrage, mais progressif qui est bien plus efficace que le filtrage traditionnel par carte de contrôle. C'est là une piste de progrès très importante pour l'amélioration des capacités des productions.

Le coût à payer pour ce gain de capacité est le nombre de réglages générés. En effet, la suppression de tous les filtres amène à corriger à chaque prélèvement. Cela est sans importance si la liaison entre la mesure et la commande de la machine est numérique. C'est difficile à envisager si la correction se fait par l'homme.

4.4.3. Efficacité de la pondération inertielle

On note l'efficacité de la pondération de la matrice de pilotage par les tolérances, notamment sur la réponse des capacités moyennes obtenues. Le graphe des effets montre que c'est le facteur prépondérant pour cette réponse. D'un point de vue plus empirique, on note que les 8 premiers essais qui n'ont pas la pondération inertielle ont obtenu des résultats très mauvais. Cette méthode de pilotage doit absolument être retenue pour utiliser le pilotage inertiel multicritères.

4.4.4. Efficacité très faible de la correction complète

La correction complète de tous les correcteurs impactés qui consiste à ne filtrer que les caractéristiques qui ne sont pas concernées par un correcteur sollicité pour agir sur une autre caractéristique amène un gain de capacité mais de façon marginale.

4.4.5. Meilleur compromis nombre de réglages/capacité

L'analyse des graphes des effets nous suggère que le meilleur compromis entre le nombre de réglages et les capacités consiste à retenir l'ensemble des facteurs étudiés. Cet essai ne figure pas dans les essais du plan, nous l'avons réalisé. Le tableau 4 donne les résultats obtenus qui confirment les très bonnes capacités pour un nombre réduit de réglages.

Configuration					
Facteurs	Pilotage inertiel pondéré	Pondération de réglage	Filtrage des écarts par carte de contrôle	Correction complète	Filtre sur risque beta
Niveaux	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Résultats					
Réponses	Prévu par le modèle		Obtenus	Erreur de prévision	
Nombre de réglages	385		375	5.3%	
Pp Moyen	2.31		2.30	2.5%	
Pp sur la cote b	1.56		1.61	3.9%	

Tableau 4. *Optimum pour le compromis réglages/capacité*

4. Conclusions

Le pilotage inertiel multicritères et encore plus le pilotage inertiel multicritères pondéré marque une avancée majeure dans le pilotage des machines de production en fournissant une démarche simple et performante pour obtenir d'excellentes capacités. Plus récemment la pondération de réglage et la correction complète ont été proposées. Cet article avait pour but de quantifier l'intérêt de ces différentes approches couplées à un filtrage par carte de contrôle qui représente actuellement une bonne pratique reconnue.

Nous avons pu montrer par une expérimentation sur simulateur l'intérêt d'utiliser les différentes approches proposées dans le cadre du pilotage inertiel multicritères. Nous avons également ouvert une nouvelle piste de recherche en montrant que la bonne pratique d'utiliser des cartes de contrôle pouvait être largement dépassée par de nouvelles approches de filtrage proportionnelles aux écarts constatés.

Cette nouvelle voie de pilotage des machines prend tout son sens avec l'automatisation des liens entre le mesurage des produits et la commande numérique des machines.

12. Bibliographie

- Dong H., Yang S., Wu D., "Intelligent Prediction Method for Small-Batch Producing Quality Based on Fuzzy Least Square SVM", *Systems Engineering - Theory & Practice* Volume 27, Issue 3, March 2007, Pages 98-104
- Gibson P. R., Hoang K., Automatic Statistical Process Control of a CNC Turning Centre Using Tool Offsets and Tool Change; *Int J Adv Manuf Technol* (1994) 9:147-155
- Goldschmidt E., Gammes et cotation pour le réglage des machines-outils de décolletage. Thèse de doctorat de l'Université de Savoie, France, 2009.
- Jenningsa A. D., Drakea P. R., "Machine tool condition monitoring using statistical previous quality control charts", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 37, Issue 9, September 1997, Pages 1243-1249
- Kumara S., Nassehia A., Newmana S. T., Allenb R. D., Tiwaric M. K., Process control in CNC manufacturing for discrete components: A STEP-NC compliant framework, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23 (2007) 667–676
- Motorcub A.R., Güllü A., "Statistical process control in machining, a case study for machine tool capability and process capability", *Materials & Design*, Volume 27, Issue 5, 2006, Pages 364-372
- OGP transfert, SIMDI 2011 – Logiciel didactique de simulation de processus industriels – *OGP Transfert* (<http://www.ogp-annecy.com>)

- Pairel E., Goldshmidt E., Adragna P.A., Hernandez P., Pillet M. – "The pilot dimensions method: Reconciling Steering and Conformity in Workshops" - *International Journal of Production Research* – iFirst (2010) 1–14
- Pillet M., Denimal D., "A better coherence between design and production with the Total Inertial tolerancing", *International Journal of design and Innovation Research* (2011)
- Pillet M., Améliorer la productivité – Déploiement industriel du tolérancement inertiel – *Editions d'organisations*, ISBN 978-2-212-54754-2, 2010, 220 pages
- Pillet M., Adragna P.A., Ozouf V., Guerra A.S. – Pilotage par carte de contrôle dans le cas d'un tolérancement inertiel, *Qualita 2007* – CDROM, Tanger Maroc, 9 Pages
- Shewhart, W.A., Economic Control of Quality of Manufactured Products. *New York: Van Nostrand, London: MacMillan*, 1931, 501 p. (1980 by *American Society for Quality*).